

O apagamento da natureza polissêmica do Princípio da Incerteza Tempo-Energia nos Livros Didáticos do Ensino Superior

The erasure of the polysemic nature of the Time-Energy Uncertainty Principle in Undergraduate Textbooks

Gabriela Gomes Rosa

Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Física
gabriela.gomes@ufrgs.br

Nathan Willig Lima

Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Física
nathan.lima@ufrgs.br

Jaíne Alvarenga da Cruz

Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Física
jaíne.ac@hotmail.com

Cláudio José de Holanda Cavalcanti

Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Física
claudio.cavalcanti@ufrgs.br

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo identificar as diferentes interpretações do Princípio da Incerteza proposto por Werner Heisenberg, em sua versão que mobiliza as grandezas tempo e energia, e analisar como essas interpretações estão presentes em livros didáticos de Física Quântica do Ensino Superior (identificando quais estão presentes, quais foram apagadas e quais foram transformadas). Adotando como referencial a Sociologia Simétrica de Educação em Ciências, a presença de tais interpretações em livros-texto podem ser considerada como medida de sua estabilização ontológica. Com base no texto original de Heisenberg e com o auxílio da literatura especializada identificou-se como cinco as possíveis interpretações para o Princípio da Incerteza Tempo-Energia. Em uma avaliação preliminar, através de uma pesquisa qualitativa por meio da análise de 3 livros-texto, apontou-se que a pluralidade de interpretações para a incerteza tempo-energia é apagada dos livros didáticos e tal apagamento colabora com a visão de senso comum da ciência.

Palavras chave: princípio da incerteza, física quântica, livro didático.

Abstract

This work has as main objective to identify the different interpretations of the Uncertainty Principle proposed by Werner Heisenberg, in its version that mobilizes the time and energy

quantities, and to analyze which of these interpretations are present in Higher Education Quantum Physics textbooks (identifying which are present, which are erased and which are transformed). Adopting the Symmetric Sociology of Science Education as theoretical framework, the presence of such a proposition in textbooks can be considered as a measure of its ontological stabilization. Based on Heisenberg's original text and with the help of specialized literature, we identified five possible interpretations for the Time-Energy Uncertainty Principle. In a preliminary evaluation, through the analysis of 3 textbooks, we point out that the plurality of interpretations for time-energy uncertainty is erased from textbooks and this erasure collaborates with the commonsense view of science.

Key words: uncertainty principle, quantum physics, textbook.

Introdução

O ensino de Física Quântica no ensino superior em geral é essencialmente instrumentalista, privilegiando a resolução de problemas matemáticos e subestimando a importância de discussões conceituais e filosóficas (JOHANSSON et al., 2018). O favorecimento de tal abordagem pode trazer impactos significativo na formação de licenciados em Física e implica negativamente na maneira como a Física Moderna e Contemporânea será, posteriormente, levada para a educação básica.

Ademais, subsídios filosóficos de tal tendência pedagógica no ensino de Física (a dizer, seus traços positivistas e pragmáticos) encontra pontos de tangenciamento com a própria interpretação 'padrão' (ou *interpretação hegemônica*), da Física Quântica (JAMMER, 1966, 1974), a *Interpretação de Copenhague*. Segundo o físico alemão Werner Heisenberg, que pode ser considerado um dos fundadores dessa interpretação, a Interpretação de Copenhague está fundamentada sobre três principais teses: o princípio da complementaridade, a interpretação probabilística de Born e o Princípio da Incerteza (HEISENBERG, 2000). Devido à ênfase dada pela comunidade científica à Interpretação de Copenhague, o objetivo deste trabalho é apresentar como que um de seus elementos, a dizer, o Princípio da Incerteza (em sua versão em que o tempo e a energia são mobilizados) foi traduzido e cristalizado em livros didáticos do ensino superior de Física Quântica.

Uma das maneiras de mensurar a relevância de um conceito ou de uma tese é por meio da análise de sua incorporação nos livros didáticos utilizados pelo ensino superior na formação de cientistas, pois, como Thomas Kuhn (2017) ressalta, é por meio dos manuais de instrução que os cientistas aprendem os domínios de sua disciplina, seus métodos característicos de fazer ciência e seus problemas exemplares. Tendo em vista o papel dos manuais, é possível reconhecer que os livros didáticos também são responsáveis por difundir o ensino de física quântica instrumentalista e tecnicista destacado por Johansson, et al (2018), que é próprio da pedagogia científica do período da guerra fria (HOERNIG; MASSONI; LIMA, 2020; KAISER, 2005) e favorece o que Chalmers (1993) define como uma concepção de ciência de senso comum.

Realizando a análise de três de livros-texto utilizados em cursos de Física Quântica do ensino superior, buscou-se por responder as seguintes questões de pesquisa: a) O que Heisenberg entendia como Princípio da Incerteza Tempo-Energia? b) Quais possíveis interpretações do Princípio da Incerteza Tempo-Energia foram articulados pela comunidade de físicos? c) Os

livros de Física Quântica de ensino superior falam sobre o Princípio da Incerteza Tempo-Energia? d) Os livros didáticos reconhecem a existência de diferentes interpretações para o Princípio da Incerteza Tempo-Energia? e) Quais elementos das diferentes interpretações do Princípio Tempo-Energia estão presentes nos livros didáticos e quais foram silenciados? f) Quais os possíveis motivos de tal silenciamento e suas implicações na formação de professores de física?

Referencial Teórico-Methodológico

Este trabalho foi realizado a partir da perspectiva estabelecida pela Sociologia Simétrica da Educação em Ciências (LIMA et al., 2018; VAZATA et al., 2020) e consiste em uma pesquisa qualitativa fundamentada nas proposições metodológicas trazidas por esta. Tal perspectiva propõe que a consolidação de uma teoria científica ocorre através das redes sociotécnicas mobilizadas por ela, tais redes conectam diferentes atores, sendo eles humanos e não-humanos, e podendo atribuir a cada um deles diferentes performances. Ainda conforme essa perspectiva, para que uma teoria passe a ser considerada um fato ela deverá passar por um processo de estabilização, onde poderá ser modificada ou até mesmo desestabilizada, nesse último caso a teoria deixa de ser considerada um fato e passa a ser considerada um artefato. É possível analisar tal processo de estabilização verificando como os livros didáticos narram tal teoria (LIMA et al., 2018) e tomando a quantidade de vezes que a mesma está presente nos livros texto como medida de sua estabilização (VAZATA et al., 2020).

A pesquisa iniciou através de um estudo do artigo original escrito por Heisenberg e da análise da literatura secundária (BUSCH, 2008; JAMMER, 1966, 1974; PESSOA JR., 2003). A partir desses primeiros passos, foram caracterizados os principais grupos de interpretações do princípio da incerteza tempo-energia. Na sequência os passos seguintes consistiram em analisar qualitativamente os enunciados trazidos por 3 livros-texto, escolhidos por sua presença usual nos cursos de Física Quântica do ensino superior e por cada exemplar compatibilizar com um diferente nível de formação, sobre o Princípio da Incerteza Tempo-Energia, identificando com qual das interpretações (propostas na próxima seção) cada livro se assemelhava e, por fim, quantificar a importância relativa de cada proposição na amostra de livros analisada.

O Princípio da Incerteza

O Princípio da Incerteza foi proposto pelo físico alemão Werner Heisenberg e apresentado pela primeira vez a comunidade científica em 1927 no texto "*The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics*". O principal objetivo de Heisenberg era argumentar em prol da interpretação corpuscular estabelecida pela mecânica matricial frente a interpretação ondulatória proposta pela teoria de Erwin Schrödinger (que estava tendo grande aceitação pela comunidade científica da época), uma vez que as duas interpretações disputavam pela formalização da Física Quântica (HEISENBERG, 1996). Segundo Heisenberg (1996), foi durante a tentativa de descrever matematicamente a trajetória do elétron no experimento da câmara de nuvem quando o físico se questionou se seria possível que a mecânica quântica fosse capaz de representar, com certa imprecisão, o fato do elétron se encontrar em determinada posição e se mover com determinada velocidade e se seria possível tornar essas imprecisões tão pequenas a ponto de que não ocasionassem obstáculos experimentais. No texto de 1927 Heisenberg propõe que todas as grandezas físicas que não comutam devem obedecer ao Princípio da Incerteza, seu principal foco é discutir a incerteza posição-

momentum, mas o físico também demonstra, de uma maneira que atualmente consideramos como problemática, a relação de comutação para as variáveis tempo e energia, sugerindo uma relação de incerteza entre as grandezas e discutindo-a por meio da análise do experimento de Stern-Gerlach.

As diferentes interpretações para a Incerteza Tempo-Energia

No artigo de 1927, Heisenberg adota duas diferentes interpretações para as variáveis de Tempo e Energia definindo, em um primeiro momento, E_1 como a incerteza na medida da energia e t_1 como o tempo de duração do experimento, e posteriormente, E_1 como a diferença de energia entre dois níveis atômicos e t_1 como o tempo de um salto quântico. O que responde à questão de pesquisa (a).

Segundo Paul Busch (2008), o tempo pode desempenhar três papéis distintos na mecânica quântica: *tempo externo*, onde o tempo é medido externamente, com relógios ou outros sistemas, tal como se entende na Física Clássica; *tempo intrínseco*, onde o tempo é o intervalo necessário para ocorrer determinada variação de um parâmetro físico do sistema quântico, cada variável dinâmica do sistema marca a passagem do tempo; *tempo observável*, onde o tempo é definido como um operador, um autoestado do tempo observável e só pode ser definido em uma extensão da teoria dos observáveis que permite o uso de operadores não-auto-adjuntos.

Tomando como referência a análise feita por Paul Busch (BUSCH, 2008) em diálogo com a classificação estabelecida por Osvaldo Pessoa Jr. (PESSOA JR., 2003), propomos, na Tabela 1, cinco diferentes classificações para a incerteza Tempo-Energia, que explicita sua natureza polissêmica e com a qual pretendemos responder a questão de pesquisa (b).

Tabela 1: Interpretações para a Incerteza Tempo-Energia.

Interpretação	Representação	Significado
1	$T_{\text{ext}}, \Delta E$	T é um parâmetro externo (ΔT_{ext} é um intervalo de tempo, medido externamente com relógios ou outros sistemas, tal como se entende na Física Clássica), ΔE é uma variação de energia.
2	$T_{\text{ext}}, \epsilon_E$	T é um parâmetro externo (ΔT_{ext} é um intervalo de tempo, medido externamente com relógios ou outros sistemas, tal como se entende na Física Clássica), ϵ_E é a resolução da medição de energia, ou a imprecisão na medida.
3	$T_{\text{int}}, \epsilon_E$	T é um parâmetro intrínseco (ΔT_{int} é o intervalo necessário para ocorrer uma determinada variação de um parâmetro físico do sistema quântico, onde cada variável dinâmica do sistema marca a passagem do tempo), ϵ_E é a resolução da medição de energia, ou a imprecisão na medida.
4	$T_{\text{int}}, \Delta H$	T é um parâmetro intrínseco (ΔT_{int} é o intervalo necessário para ocorrer uma determinada variação de um parâmetro físico do sistema quântico), ΔH é o desvio padrão do operador hamiltoniano, que se refere apenas a conjuntos.
5	$\hat{\Delta T}, \hat{\Delta H}$	\hat{T} e \hat{H} são operadores definidos na relação de comutação canônica, onde \hat{T} é o tempo observável. $\hat{\Delta T}$, $\hat{\Delta H}$ são desvios padrão, que se referem apenas a conjuntos.

Fonte: autores.

A estabilização do Princípio da Incerteza Tempo-Energia em Livros Didáticos do Ensino Superior

Na Tabela 2 encontra-se o resultado da análise feita com base na Tabela 1. Para este trabalho foram selecionados três exemplares utilizados nos cursos de física do ensino superior em diferentes níveis de formação). Nas colunas seguintes estão sinalizadas as proposições da incerteza mobilizada pelo livro: 1: T_{ext} , ΔE . 2: T_{ext} , ϵ_E . 3: T_{int} , ϵ_E . 4: T_{int} , ΔH . 5: $\Delta \hat{T}$, $\Delta \hat{H}$. NA: não se aplica.

Tabela 2: Resultado do Mapeamento do Princípio da Incerteza Tempo-Energia em Livros Didáticos do Ensino Superior.

Ano de Publicação	Livro	1	2	3	4	5	NA
1974	(EISBERG; RESNICK, 1985)		X	x			
1995	(GRIFFITHS, 2005)				x		
2007	(HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2014)			x			

Fonte: autores.

Nos trechos abaixo estão apresentados extratos que exemplificam as diferentes interpretações presentes nos livros tomados como objeto de estudo e que foram utilizados para a classificação presente na Tabela 2.

No livro introdutório (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2014), foi encontrada a interpretação 3,

“[...] ΔE é uma medida da incerteza com a qual a energia de um estado pode ser definida. A quantidade Δt é uma medida do tempo disponível para medir essa energia. Na verdade, aqui Δt é apenas t_{avg} , a vida média do núcleo composto antes do seu estado fundamental.” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2014, p.1300, tradução livre).

Bem como no livro intermediário (EISBERG; RESNICK, 1985).

“[...] onde ΔE é a incerteza em nosso conhecimento da energia E de um sistema e Δt o intervalo de tempo característico da taxa de mudança no sistema.” (EISBERG; RESNICK, 1985, p.66, tradução livre).

Ainda no livro intermediário foi identificado um trecho contendo a interpretação 2

“Se p_x possui a incerteza Δp_x , então a incerteza em E é dada por $\Delta E = (p_x/m)\Delta p_x = v_x \Delta p_x$. Aqui v_x pode ser interpretada como a velocidade de recuo ao longo do x do elétron que é iluminado com luz em uma medida de posição. Se o intervalo necessário para a medida é Δt ...” (EISBERG; RESNICK, 1985, p.68, tradução livre).

Já no livro avançado (GRIFFITHS, 2005), considerando o contexto e o trecho a seguir, foi identificada a interpretação 4.

"Em particular, o Δt no princípio da incerteza tempo-energia não é o desvio padrão de uma coleção de medidas de tempo; a grosso modo [...] é o tempo que leva para que o sistema mude substancialmente." (GRIFFITHS, 2005, p.114, tradução livre).

Resultados e Discussões

Dentro da amostra de livros estudados, o Princípio da Incerteza Tempo-Energia mostrou-se presente e, tendo em vista o papel fundamental do livro didático na formação dos cientistas

(KUHN, 2017), entende-se que o Princípio da Incerteza Tempo-Energia está, de fato, presente nos cursos de graduação em diferentes níveis de ensino, seja nas disciplinas mais fundamentais quanto nas mais avançadas.

Entretanto, nenhum dos autores dos livros escolhidos para este estudo explicita a existência de mais do que uma interpretação, o que é percebido como uma maneira de apagar a natureza polissêmica do Princípio da Incerteza Tempo-Energia dos livros didáticos. Neste contexto, identificou-se que Griffiths (2005) e Halliday, Resnick e Walker (2014) trazem uma única interpretação, enquanto Eisberg e Resnick (1985) trocam de interpretação ao longo do texto sem nenhuma problematização mais aprofundada. Além disso, entende-se que a interpretação 5 foi apagada de fato, pois não há sinais dela em nenhum dos livros analisados.

Destaca-se que a interpretação e 5 foi, de fato, silenciada, uma vez que não foi encontrada a presença do *tempo observável* em nenhum dos livros analisados, e compreende-se tal silenciamento devido ao fato de tratar-se de uma discussão demasiado complexa e com propostas concretas relativamente recentes para aparecer em livros didáticos.

Considerações Finais

Na gênese do Princípio da Incerteza, o próprio Werner Heisenberg (1927) propõe duas diferentes interpretações para a incerteza Tempo-Energia, sendo uma centrada nos aspectos pragmáticos do experimento e outra voltada para os parâmetros internos ao sistema atômico. Entretanto, no decorrer dos avanços da teoria quântica, a comunidade científica articulou, ainda, outras três diferentes versões, gerando um total de cinco possíveis interpretações para a incerteza tempo-energia (BUSCH, 2008; PESSOA JR., 2003).

Contudo, os livros de ensino superior, que são responsáveis pela formação de cientistas e professores de ciências (KUHN, 2017), dentro da amostra estudada, tratam do Princípio da Incerteza Tempo-Energia, mas não reconhecem sua natureza polissêmica. Desta forma, entende-se que a natureza polissêmica do Princípio da Incerteza é apagada dos cursos de formação de físicos e professores de física, uma vez que não se discute a existência de mais de uma interpretação para o mesmo e que tal escolha, realizada por parte dos autores, acaba por silenciar, inclusive, as interpretações propostas originalmente por Werner Heisenberg na gênese de sua teoria. Cabe ressaltar que, ainda que se estudados em conjunto os livros apresentem três das diferentes interpretações para o Princípio da Incerteza Tempo-Energia, os mesmos não explicitam o fato de tratarem de interpretações diferentes, o que não colabora com o entendimento da natureza polissêmica e pode, talvez, confundir os alunos.

O apagamento de tal pluralidade pode ser entendido como uma forma de corroborar com a perspectiva de uma ciência linear, cumulativa e objetiva - características que se enquadram no que Chalmers (1993) define por ciência de senso comum e que há décadas vem sendo questionada pela área de Educação em Ciências.

Além disso, estudos na área de Educação em Ciências mostram que para a formação de professores de ciências com uma visão consistente de Natureza da Ciência e que sejam capazes de não reproduzir a visão de ciência do senso comum em suas salas de aula, não basta que sejam inseridas disciplinas de epistemologia e história da ciência apenas nos últimos semestres da graduação (CARVALHO, 2017), pelo contrário, é necessário um curso inteiro que traga diferentes vertentes e perspectivas sobre conceitos físicos, que exigem discussões epistemológicas. Neste contexto, uma possível contribuição (ainda que não suficiente) é mostrar a pluralidade interna da ciência, tanto conceitual quanto metodológica.

Referências

- BUSCH, P. The Time-Energy Uncertainty Relation. In: MUGA, J. G.; MAYATO, R. S.; EGUSQUIZA, L. (Eds.). **Time in Quantum Mechanics**. 2nd ed ed. Berlin: Springer, 2008.
- CARVALHO, F. de A. **Natureza da ciência no ensino básico: perspectivas, desafios e limitações imbricados em uma rede de ações**. 2017. [s. l.], 2017.
- CHALMERS, A. F. **O que é Ciência afinal?** São Paulo: Editora Brasiliense, 1993.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. **Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei and Particles**. 2nd. ed. New York: John Wiley and Sons, 1985.
- GRIFFITHS, D. J. **Introduction to Quantum Mechanics**. 2 nd ed. Upper Saddle River: Pearson Education International, 2005.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamental of Physics: extended**. 10. ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2014.
- HEISENBERG, W. **A parte e o todo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.
- HEISENBERG, W. **Physics and Philosophy**. London: Penguin Books, 2000.
- HOERNIG, A. F.; MASSONI, N. T.; LIMA, N. W. As visões sobre a ciência e sobre a realidade nos enunciados de Richard P. Feynman: Uma análise metalinguística de alguns de seus textos didáticos e de divulgação científica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s. l.], v. 42, 2020.
- JAMMER, M. **The Conceptual Development of Quantum Mechanics**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.
- JAMMER, M. **The Philosophy of Quantum Physics**. New York: John Wiley and Sons, 1974.
- JOHANSSON, A. et al. “Shut up and calculate”: the available discursive positions in quantum physics courses. **Cultural Studies of Science Education**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 205–226, 2018.
- KAISER, D. **Pedagogy and the Practice of Science: Historical and Contemporary Perspectives**. Cambridge: MIT Press, 2005.
- KUHN, T. S. **A Estrutura das Revoluções Científicas**. 13. ed. São Paulo: Perspectiva, 2017.
- LIMA, N. W. et al. Um Estudo Metalinguístico sobre as Interpretações do Fóton nos Livros Didáticos de Física Aprovados no PNLDEM 2015: Elementos para uma Sociologia Simétrica da Educação em Ciências. **Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 331–364, 2018.
- PESSOA JR., O. **Conceitos de Física Quântica**. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
- VAZATA, P. A. V. et al. Onda ou Partícula? Um Estudo das Trajetórias Ontológicas da Radiação Eletromagnética em Livros Didáticos de Física da Educação Básica. **Revista**

Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, [s. l.], p. 855–885, 2020.